基于高通滤波器的铁路谐波抑制研究

马奇志[1]　谢旭钦[2]　邓焯辉[3]　阮白水[4]　张　钢[4]

（1. 北京交通大学电气工程学院　北京　100044

2. 广州供电局有限公司　广州　510620

3. 广州铁路（集团）公司　广州　510000

4. 北京交通大学北京市轨道交通电气工程技术研究中心　北京　100044）



马奇志　女　1968年生，硕士，研究方向为电力电子与电力传动。



谢旭钦　男　1990年生，硕士，研究方向为动车组关键技术和牵引网。

摘要：随着交－直－交动车组在电气化铁道中的大量使用，动车组产生的高次谐波引起的牵引网谐波放大、谐振问题越发严峻。针对该问题，本文建立了牵引网的等效电路模型，对牵引网谐振和谐波放大特性进行理论分析和仿真验证，并介绍了一种通过在机车内的牵引变压器辅助绕组上增加高通滤波器来抑制谐波电流增益的方法。最后通过理论计算和仿真验证了该方法抑制谐波增益的有效性，对防止谐波对牵引网造成的危害有一定的参考价值。

关键词：铁路牵引供电系统　谐波传输特性　高通滤波器　Matlab 仿真

中图分类号：TM464

Research on Railway Harmonic Suppression Based on High-Pass Filter

Ma Qizhi[1]　*Xie Xuqin*[2]　*Deng Zhuohui*[3]　*Ruan Baishui*[1]　*Zhang Gang*[1]

（1. Beijing Jiaotong University　Beijing　100044　China

2. Guangzhou Power Supply Bureau Ltd.　Guangzhou　510620　China

3. Guangzhou Railway (Group) Company　Guangzhou　510000　China）

Abstract: With the extensive uses of electric multiple units (EMU) in electrified railway, harmonic resonance problem of traction network resulted from high frequency harmonics generated by electric multiple units becomes more serious. To solve this problem, the equivalent circuit model of traction network is built in the paper to analysis harmonic resonance and amplification characteristics theoretically, and the characteristics by simulations are verified. Thus, a harmonic resonance suppression method is introduced by installing high-pass filter in the locomotive traction transformer secondary winding. A method is presented to select filter element parameters, and the effectiveness of harmonic suppression method are verified through theoretical calculations and simulations, which has reference value for harmonic resonance hazard prevention.

Keywords: Traction power supply system, harmonic transmission characteristics, high-pass filter, Matlab simulation

“十二五”国家科技支撑计划重点项目（2013BAG21QB00）、国家自然科学基金联合基金项目（U1134204）资助。

1 引言

交－直－交动车组在电气化铁道中的大量采用，使得铁路牵引供电系统中的谐波特性发生变化，除了含有低频带 3、5、7、9 等次谐波外，在高频带还出现了大量的高次谐波。尽管这些高频带谐波含有率不高，但却大大增加了系统发生谐波谐振的可能性。当牵引网参数同机车高次特征谐波匹配时会发生谐振和严重的谐波放大，当系统发生谐波谐振时，会形成较大的过电压和过电流，危害牵引变电所和电力机车等的绝缘设备，引起设备烧损，影响系统安全运行。由于系统谐振导致牵引变电所谐波电流严重放大，致使母线电压升高，造成事故的案例已有发生。

对牵引网的谐波抑制目前主要有两种方法 [1]。第一种方法是在牵引变电所安装补偿装置。在牵引变电所处并联无源滤波器，从而改变牵引网阻抗特性，抑制谐波增益。由于牵引网额定电压是 25kV，加装该类装置需额外配置降压变压器，使得成本大大提升。第二种方法是在机车内的牵引变压器辅助绕组上加装补偿装置，同样达到谐波抑制的效果。补偿装置主要分两类：一类是有源滤波装置，通过补偿电力机车产生的谐波来从根本上消除谐波的影响；另一种是由电容、电感和电阻构成无源滤波绕组，通过改变牵引网的阻抗特性减小牵引网的谐波增益。前者由于实现上较为困难，而且成本过高，目前应用较少；后者的实现相对简单，具有成本低、结构简单和运行稳定的优点。

本文建立了牵引网等效电路模型联合仿真模型，并对牵引网谐振和谐波放大特性进行理论分析和仿真验证。由于高通滤波器能滤除高次谐波带，本文介绍了通过增加高通滤波器来抑制谐波电流谐振的方法，并通过理论计算和仿真验证了该方法的有效性，对防止谐波对牵引网造成的危害有一定的参考价值。

2 铁路牵引供电系统及等效电路模型

2.1 铁路牵引供电系统

自耦变压器（Auto-Transformer，AT）供电方式是我国高速铁路广泛采用的供电方式，其供电系统结构如图 1 所示。主要构成包括 [2-3]：①安装在牵引变电所内的 Scott 变压器。其主要作用是将三相 110kV 或 220kV 电压变为两相相位相差 90° 的 55kV 电压。AT 供电模式下一般每 30 ～ 50km 会设置一个牵引变电所，通过分区将整个牵引网连接起来；②自耦变压器。AT 供电模式下，每 10km 左右会设置一个 AT，其两端连接着馈线和接触网，中性点连接着钢轨。自耦变压器将 55kV 电压降至 27.5kV 左右，给机车供电；③牵引网系统。牵引网系统几何结构复杂，它由接触线、承力索、负馈线、保护线、钢轨和埋地线等组成，如图 2 所示。

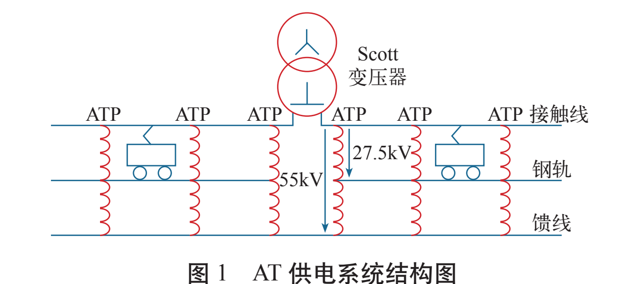


图 1　AT 供电系统结构图

Fig.1　Structure of AT power supply system

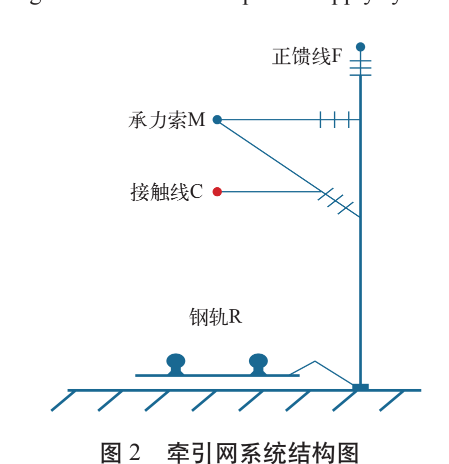


图 2　牵引网系统结构图

Fig.2　Structure of traction network system

2.2 铁路牵引供电系统等效电路模型

从图 2 可以看到牵引网系统复杂，导线数目较多。文献 [4] 引入多导体传输线模型，对导线数目进行合并简化，在建立模型时可将承力索、加强线按多导体传输线电感矩阵法等效到接触线中，将地埋线等效到钢轨中，最终可以简化成一个三导线的等效电路，这种简化并不影响模型的精度。文献 [5] 给出了多导体传输线系统的等效降解过程，通过反复计算可以得到多导体传输线系统整体对外阻抗 Z 和导纳 Y。牵引网系统可以简化为图 3 所示的等效电路，其中，Z_{SS} 为变电所等效阻抗（包括电源电抗和牵引变压器电抗）；I_x 为距离变电所 x 处的牵引网电流；I_1 为流向牵引变电所（Substation，SS）方向的机车电流；I_2 为流向分区所（Section Post，SP）方向的机车电流；I_T 为机车电流；L_1 为机车到变电所距离；L_2 为机车到分区所距离；Z_1、Z_2 分别为电

力机车位置向牵引变电所方向和分区所方向看去的等效阻抗[6]。

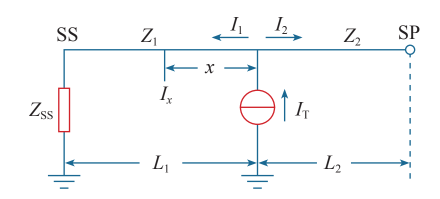


图 3　牵引网系统等效电路

Fig.3　Equivalent circuit of traction network system

根据分布参数电力传输线的稳态方程和等效电路，将电力机车两侧的分布参数电路均等效为 T 型电路，如图 4 所示。

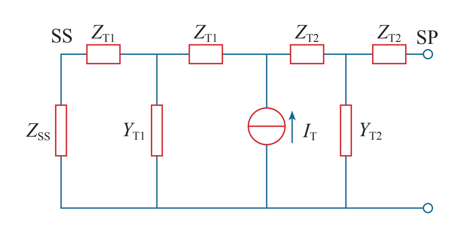


图 4　牵引网系统 T 型等效电路

Fig.4　T-type equivalent circuit of traction network system

图 4 中，Z_{T1}、Z_{T2}、Y_{T1} 和 Y_{T2} 的表达式为

$$\begin{cases} Z_{T1}=\dfrac{Z_0(\cosh\tau L_1-1)}{\sinh\tau L_1} \\ Y_{T1}=\dfrac{\sinh\tau L_1}{Z_0} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} Z_{T2}=\dfrac{Z_0(\cosh\tau L_2-1)}{\sinh\tau L_2} \\ Y_{T2}=\dfrac{\sinh\tau L_2}{Z_0} \end{cases} \tag{2}$$

式中，Z_0 为线路特征阻抗，$Z_0=\sqrt{Z/Y}$；τ 为线路传播系数，$\tau=\sqrt{ZY}$；Z、Y 分别为牵引网线路单位长等值阻抗和导纳。

将分区所处作断路处理，运用电路原理求得从机车指向牵引变电所、分区所的电阻 Z_1、Z_2。如图 5 所示。

$$\begin{cases} Z_1=Z_0\dfrac{Z_{SS}\cosh\tau L_1+Z_0\sinh\tau L_1}{Z_{SS}\sinh\tau L_1+Z_0\cosh\tau L_1} \\ Z_2=Z_0\dfrac{\cosh\tau L_2}{\sinh\tau L_2} \end{cases} \tag{3}$$

机车电流源相对整个牵引网的阻抗为上述阻抗

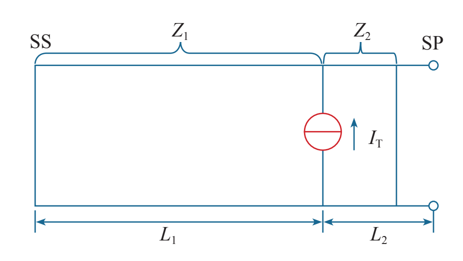


图 5　牵引网系统等效电路

Fig.5　Equivalent circuit of traction network system

并联，即

$$Z=\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}=\frac{Z_0\cosh\tau L_2(Z_{SS}\cosh\tau L_1+Z_0\sinh\tau L_1)}{Z_{SS}\sinh\tau L+Z_0\cosh\tau L} \tag{4}$$

3　谐波传输特性分析

将机车看作电流源，则始端的电流和电压都已知，即

$$\begin{cases} \dot U_1=Z\dot I_T \\ \dot I_1=\dfrac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot I_T \end{cases} \tag{5}$$

根据均匀传输线特性方程求出始端距离为 x 处的电压和电流分别为

$$\begin{cases} \dot U_x=\dot U\cosh\tau x-\dot I Z_0\sin\tau x \\ \dot I_x=\dot I\cosh\tau x-\dfrac{\dot U}{Z_0}\sinh\tau x \end{cases} \tag{6}$$

将式（5）代入式（6），可求得距离机车 x 处的谐波电流为

$$\dot I_x=\dot I_T\cosh\tau L_2\frac{Z_{SS}\sinh\tau(L_1-x)+Z_0\cosh\tau(L_1-x)}{Z_{SS}\sinh\tau L+Z_0\cosh\tau L} \tag{7}$$

牵引网谐波电流增益表达式为

$$G_x=\frac{\dot I_x}{\dot I_T}=\frac{\left[Z_{SS}\sinh\tau(L_1-x)+Z_0\cosh\tau(L_1-x)\right]\cosh\tau L_2}{Z_{SS}\sinh\tau L+Z_0\cosh\tau L} \tag{8}$$

当式（8）的分母接近于 0 时，谐波增益最大，此时线路发生谐振。由式（8）可知影响牵引供电系统谐波谐振频率的主要因素有牵引网的单位长阻抗和导纳、牵引网长度、机车位置和牵引变电所等值阻抗等。

图 6 所示为机车位置不变时（距离变电所 20km），不同牵引网长度下在变电所处测得的谐波电流增益。图 6a ～ 6c 分别是牵引网长度为 20km、30km、40km 时的谐波增益图，可见牵引网长度越

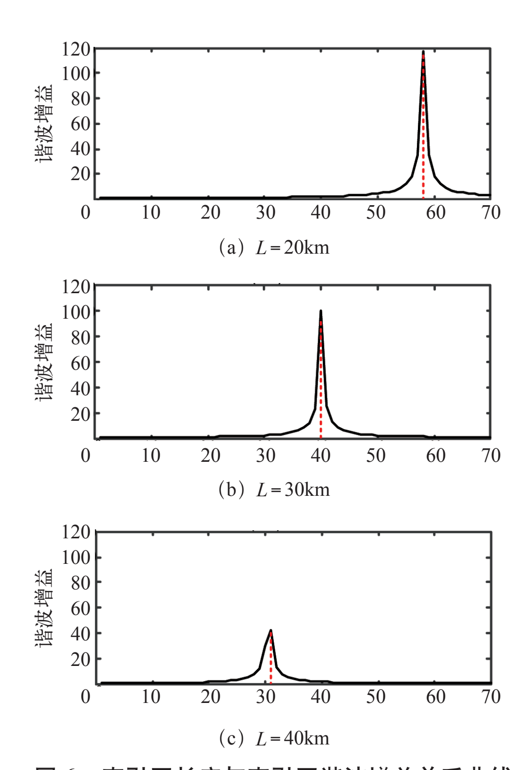


图 6　牵引网长度与牵引网谐波增益关系曲线

Fig.6　Relationship between length and harmonic gain of traction network

长，谐振频率越低。

图 7 所示为牵引网长度为 30km 时，机车位于不同位置时变电所处测得的谐波电流增益。图 7a ～ 7c 分别是机车距离变电所 10km、20km、30km 时

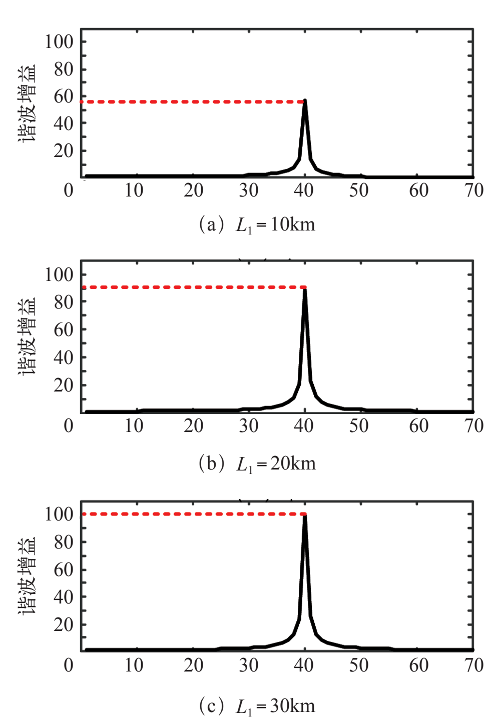


图 7　机车位置与牵引网谐波增益关系曲线

Fig.7　Relationship between locomotive position and harmonic gain of traction network

的谐波增益图，可见机车的位置不会影响谐振频率，机车距离变电所越远，谐波增益越大。

从图 7 可知，牵引网长度为 30km 时，牵引网的谐振点在 40 次谐波附近，当网侧变流器产生的谐波电流频带与其重合时，此时机车的谐波电流在牵引网中会被严重放大，对牵引供电系统造成极为恶劣的影响。

为了验证谐波抑制措施的有效性，本文后续仿真计算主要选取在牵引网为 30km 的前提下进行，即滤波器的滤波频率为 37 ～ 43 次。

4　基于高通滤波支路的谐波抑制方法

本文采用在机车内的牵引变压器辅助绕组上加装高通滤波器的方式来实现谐波电流放大抑制，其结构如图 8 所示。其中，U_S 和 U_{S1}、U_{S2} 分别为变压器一次、二次电压，C、L、R 分别为滤波器的滤波电感、滤波电容和滤波电阻。

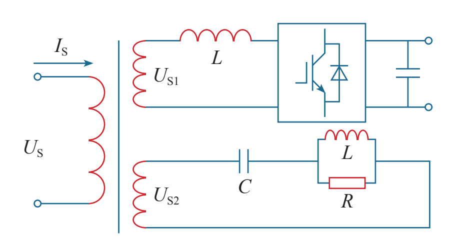


图 8　机车上加装滤波器示意图

Fig.8　Schematic diagram of locomotive with filter

加入滤波器后线路分布参数的牵引网等效模型如图 9 所示。其中，Z_F 为滤波器支路的等效阻抗（折算到牵引变压器一次侧）。

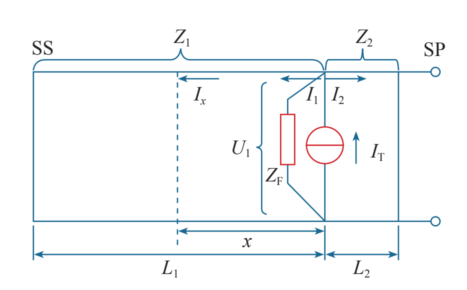


图 9　机车上加装滤波器的系统等效电路

Fig.9　Equivalent circuit of locomotive with filter

由电路定理得机车对牵引变电所方向网络输入电流和电压为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \dfrac{Y_1}{Y_1+Y_2+Y_F}\dot{I}_T \\ \dot{U}_1 = \dfrac{1}{Y_1+Y_2+Y_F}\dot{I}_T \end{cases} \tag{9}$$

式中，Y_1、Y_2、Y_F 分别为 Z_1、Z_2、Z_F 的导纳。

根据均匀传输线特性方程求出加装滤波器后的谐波电流增益，即

$$G_x=\frac{\dot{I}_x}{\dot{I}_T}=\frac{\left[Z_{SS}\sinh\tau(L_1-x)+Z_0\cosh\tau(L_1-x)\right]\cosh\tau L_2}{Z_{SS}\sinh\tau L+Z_0\cosh\tau L+(Z_{SS}\cosh\tau L_1+Z_0\sinh\tau L_1)\dfrac{Z_0\cosh\tau L_2}{Z_F}} \tag{10}$$

为了能滤除高次谐波，下面对高通滤波器进行分析。高通滤波器阻抗表达式为

$$Z_F=\frac{1}{j\omega C}+\frac{R\times j\omega L}{R+j\omega L} \tag{11}$$

将高通滤波器的特征角频率 ω_0 设为

$$\omega_0=2\pi f_0=\frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{12}$$

将高通滤波器的品质因数 Q 设为

$$Q=\frac{R}{\omega_0 L}=\omega_0 CR=R\sqrt{\frac{C}{L}} \tag{13}$$

令 $\lambda=\omega/\omega_0$，可将式（11）化简为

$$Z_F=\omega_0 L\frac{Q\lambda^2+j\left(Q^2\lambda-\lambda-\dfrac{Q^2}{\lambda}\right)}{\lambda^2+Q^2} \tag{14}$$

由式（14）可以画出高通滤波器阻抗随品质因数 Q 变化的趋势图，如图 10 所示。高通滤波器在品质因数 Q 取较小值时，频率选择性差，最小阻抗频率为无穷远处，能滤除大片的谐波带；而 Q 取较大值时，频率选择性好，存在最小阻抗频率，但高次谐波阻抗较大，不利于滤除高次谐波 [7-8]。为了滤除滤波带，Q 取为 2 ～ 8。

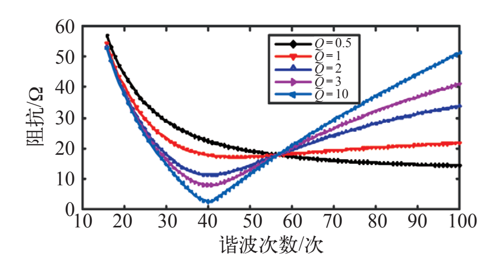


图 10　高通滤波器品质因数与阻抗

Fig.10　Relationship between quality factor and impedance of high-pass filter

式（14）两边同时平方，可以得到高通滤波器阻抗的模的平方值，即

$$|Z_n|^2=(\omega_0 L)^2\left[\left(\frac{\lambda^2}{\lambda^2+Q^2}\right)^2 Q^2+\frac{1}{\lambda^2}\left(\frac{\lambda^2 Q^2}{\lambda^2+Q^2}-1\right)^2\right] \tag{15}$$

对上式求导，可求出最小阻抗频率为

$$\frac{d|Z_n|^2}{d\lambda}=0 \tag{16}$$

$$\omega_{min}=\lambda\omega_0=\frac{Q\omega_0}{\sqrt{Q\sqrt{Q^2+2}-1}}\quad(Q>0.64) \tag{17}$$

当 $Q>2$ 时，$\omega_{min}\approx\omega_0$，即最小阻抗频率近似等于特征频率。

由式（12）可以得出高通滤波器电感 L 和电容 C 的关系为

$$C=\frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \tag{18}$$

式（11）变换为

$$Z_F=\frac{(2\pi f_0)^2 L}{j\omega}+\frac{R\times j\omega L}{R+j\omega L}=\frac{(2\pi f_0)^2 L}{j\omega}+\frac{R\times j\omega}{\dfrac{R}{L}+j\omega} \tag{19}$$

由上式可知，L 越小，高通滤波器的阻抗 Z_F 越小，滤波效果越好。根据上述分析，Q 取 2 ～ 8，特征频率取 $f_0=50\times40$Hz，L 取较小值，对 C、L、R 进行选型，给出两组典型参数（变压器二次侧）见下表。

表　高通滤波器典型参数

Tab.　Typical parameters of high-pass filter

组别	电感 /μH	电容 /μF	电阻 /Ω
1	300	21.11	20
2	200	31.66	15

5　仿真与验证

机车运行时除了会产生 3、5、7、9 次的低次谐波外，其产生高次谐波电流的频带主要由四象限变流器的开关频率决定。本文借鉴 CRH1 的四象限变流器搭建 Matlab 仿真模型，开关频率为 1kHz，采用双边沿自然采样调制，主要特征谐波为 37、39、41、43 次。图 11 为变流器网侧电流，图 12 为网侧电流的频谱分析。

建立牵引网仿真模型时，通过选取多个 1km 的

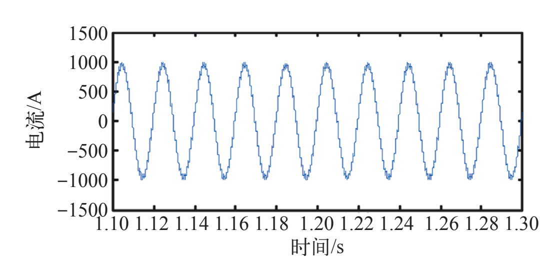


图 11　变流器网侧电流波形

Fig.11　Grid-side current waveforms of converter

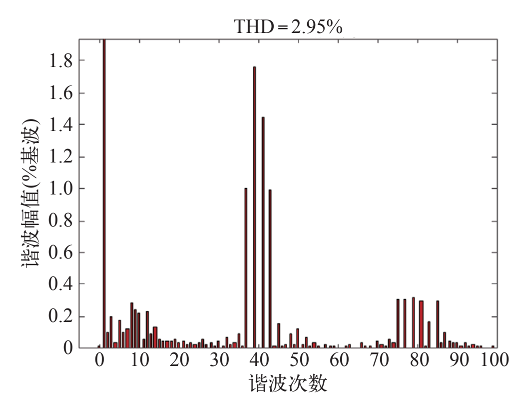


图 12　网侧电流的频谱分析

Fig.12　Spectrum analysis of grid-side current

分布式参数线路建立整个牵引网的电路模型，使其模型更接近于实际[9]。图 13 所示为长度 1km 的三导体线路模型。根据之前的计算结果，线路长度为 30km 时，谐振点在 40 次谐波附近靠近机车的高次谐波频带，为了验证谐波抑制效果，选取线路总长度为 30km。

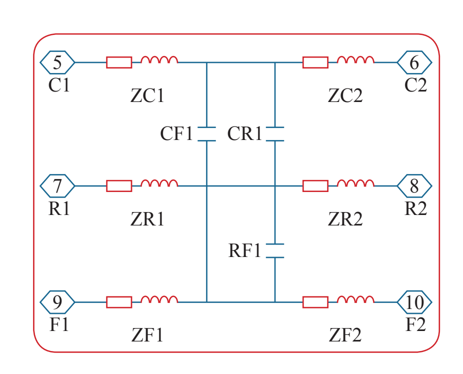


图 13　单位长度牵引网模型

Fig.13　Model of unit-length traction network

将牵引变电所、牵引网、自耦变压器等模型按 AT 牵引网的工作方式有序地连接在一起，可以得到牵引供电系统模型。当牵引网长度为 30km、机车产生的高次谐波在 40 次附近时，牵引网将发生谐振。图 14 为发生谐振时牵引变电所测得的交流电压和电流。图 15 为牵引变电所的电流频谱分析。由图可知，变电所处的交流电流已经严重畸变，失去了正弦度，谐波含量非常高，THD 高达 42%；电压出现大幅度的波动，严重危害牵引网与其他机车的运行。

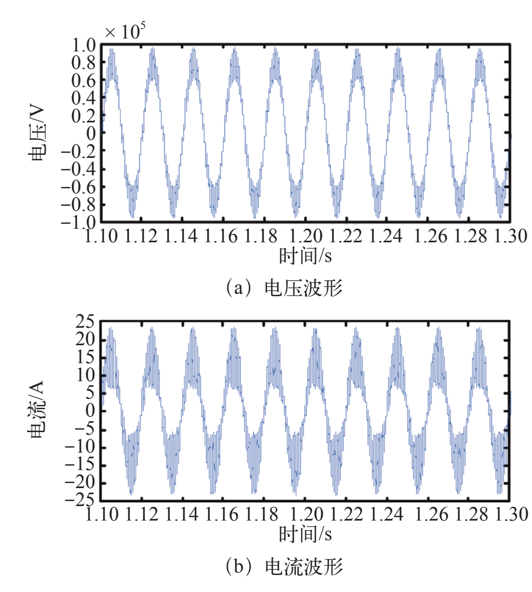


图 14　牵引变电所交流电压和电流

Fig.14　AC voltage and current in traction substation

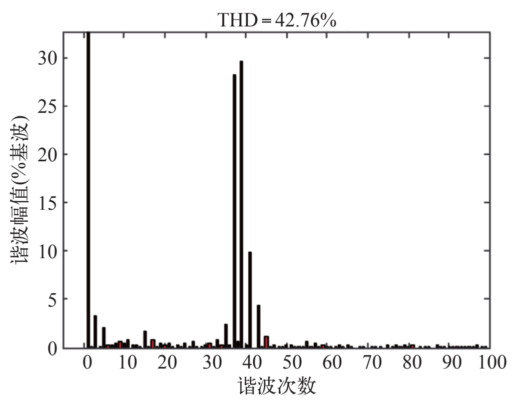


图 15　牵引变电所电流的频谱分析

Fig.15　Spectrum analysis of AC current

图 16 为加装了高通滤波器之后，在牵引变电所测得的接触网电流。由图可知交流电流谐波含量被大量滤除，恢复正弦度。

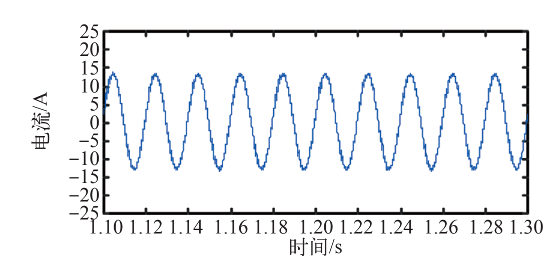
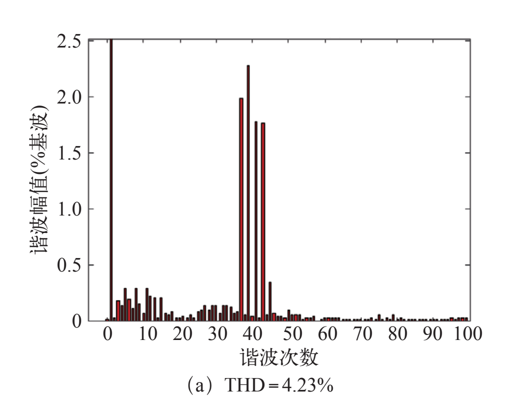


图 16　加装高通滤波器后牵引变电所的交流电流

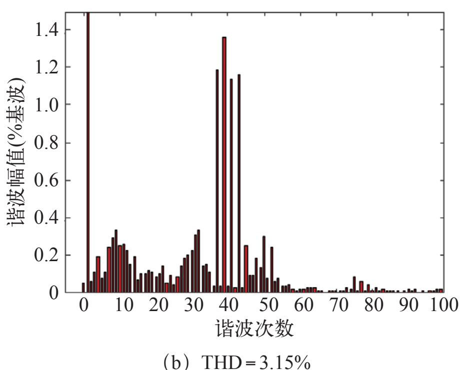
Fig.16　AC current in traction substation with high-pass filter

图 17 为加装两组高通滤波器后对应的电流频谱

图，可见加入滤波绕组后，谐波增益大大减小，验证了滤波支路的有效性。而且第二组参数滤波效果更为明显，验证了高通滤波器设计的合理性。



（a） THD=4.23%



（b） THD=3.15%

图 17　加装高通滤波器后牵引变电所电流的频谱分析

Fig.17　Spectrum analysis of AC current in traction substation with high-pass filter

6　结束语

本文建立了牵引网的等效电路模型，对牵引网谐振和谐波放大特性进行理论分析和仿真验证。仿真结果表明如果牵引网谐振点与机车的高次特征次谐波一致时，系统会发生严重的谐振，电流畸变严重。

针对该问题，本文介绍了一种通过在机车内的牵引变压器辅助绕组上增加高通滤波器来抑制谐波电流增益的方法。计算和仿真结果说明，加入了滤波绕组后，机车高次谐波电流增益大大减小，验证了该方法抑制谐波增益的有效性，对防止谐波对牵引网造成的危害有一定的参考价值。

参考文献

[1] Jingjing D, Zheng Q, Chunxing P. Harmonic analysis method for input current of traction system applied in high-speed electric multiple unit[C]. 2011 IEEE International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011(1): 30-34.

[2] 吴命利，黄足平，杨少兵，等．牵引网高次谐波谐振及暂态过电压抑制装置：中国：CN101145692[P]．2008-03-19．

[3] 郭晓旭．高速铁路牵引网建模与仿真 [D]．成都：西南交通大学，2014．

[4] 马庆安．高速铁路 AT 供电若干问题的研究 [D]．成都：西南交通大学，2013．

[5] 王奇．高速铁路牵引供电系统高次谐波谐振仿真研究 [D]．成都：西南交通大学，2009．

[6] 何正友，胡海涛，方雷，等．高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究 [J]．中国电机工程学报，2011，31(16)：55-62．
He Zhengyou, Hu Haitao, Fang Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.

[7] Rahmani S, Al-Haddad K. A single phase multilevel hybrid power filter for electrified railway applications[C]. 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2006(2): 925-930.

[8] 武惠杰，郭天兴．高通滤波器性能研究 [J]．电力电容器与无功补偿，2014，35(2)：5-8．
Wu Huijie, Guo Tianxing. Study on performance of high pass filter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(2): 5-8.

[9] 喻奇．客运专线牵引供电系统电气模型的研究 [D]．成都：西南交通大学，2009．